

基礎論文

ロボットタイルとリアドームの統合に関する研究

真中 勇太*¹ 矢野 博明*¹ 岩田 洋夫*¹

Research for integration of Robot Tile and Rear Dome

Yuta Manaka*¹, Hiroaki Yano*¹, and Hiroo Iwata*¹

Abstract — Robot Tile is one of the circulating field types of Locomotion interface which consists of five Omni-directional moveable robots. The user can keep walking in any direction with this device while it is in the place. An immersive projection display named the Rear Dome consists of a spherical rear projection screen and eight projectors. The Rear Dome can project omnidirectional images on the screen. A user can see the omnidirectional image inside the screen. We integrated the Robot Tile and the Rear Dome, and conducted the evaluation experiment.

Keywords: Locomotion interface, Omni-directional vehicle, Ensphered vision

1 はじめに

3D テレビや体を動かすゲームが商品化されている。映像などのコンテンツに対して、ユーザの動作を反映することによって得られる、その世界の奥行き感や直感的な操作性がその世界への没入感を高めることが一因と考えられる。ところでゲームなどでは空間内を移動する場合に、基本的にはフライスルーで移動を行うものが多い。歩行を模擬するように視点を上下動させる場合もあるが、ユーザ自ら歩行動作するものはほとんど無い。しかしながら、歩くという行為は、地面の状況把握や歩行による距離感覚など空間認識に重要な意味を持つ。これを実現するには、歩行動作による移動感覚提示とそれによる見えの変化を実現することが必要となる。

映像提示のみの、受動的な「見え」の変化と、自身の歩行運動にともなう「見え」の変化が、空間認識においてどのような違いが出るかは、心理物理的な実験が行われてきており、自身の歩行運動によって、距離感や方向感覚が向上することが明らかになっている [1][2][3][4][5]。

本論文は歩行運動に伴う「見え」の変化を、全方位に対して実現するシステムを提案する。位置を変えずに任意の方向に歩くことを可能にする装置は、技術的に実現が困難であるが、著者らの研究室ではこの問題について従来研究を重ね、最も新しい方式として、複数の可動床ロボットを循環させる「ロボットタイル」を開発している。また、任意の方向に歩いた場合に、それに対応した「見え」の変化を提示するためには、全方位の映像ディスプレイが必要

である。人間の視野は水平に 200 度、垂直に 120 度程度あるため、自然な「見え」の変化を提示するためには、歩行者を中心にしたほとんど全ての立体角を覆うディスプレイが必要になる。著者らはこの問題に対して球面ディスプレイの研究を重ねてきており、最も新しい方式は、全周球面スクリーンに、画質的に有利な背面投射を行う「リアドーム」である。本論文は、これらのロボットタイルとリアドームをシステムとして統合し、歩行運動に伴う「見え」の変化がどのように実現できたかを検証する。

2 関連研究

一般に人間が歩行を行うにはその移動量分の空間が必要となるが、自由に歩き回れる広い空間を作るとは現実的ではない。そこで、平地や階段など地面の状況に応じて足に反力を提示しつつ、歩行動作による身体移動を打ち消すことで、限られたスペースで体験者に無限の歩行面を提示する装置：ロコモーションインタフェース(以下 LI)が開発された。歩行者の移動量を打ち消す引き戻し方法は大きく 2 種類に分類できる。歩行者自らの滑り動作で進めた足を引き戻す「パッシブ式」と、機械的に引き戻し動作を行う「アクティブ式」である。パッシブ式は機構が単純であるが、凹凸面提示が難しく、ユーザ自ら足を引き戻さなくてはならない為、実空間での歩行感覚とは異なる。アクティブ式は機構は複雑であるが、凹凸面の提示も可能で、ユーザの自発的引き戻し動作が不要であり、実空間での歩行と同様の感覚を提示可能である。

アクティブ式には大きく分けて 4 つのタイプがある。「連続面型」は歩行者が歩く全域を 1 つの可動面で実現する方式である。代表的なものとして、ATR 知能映像

*1 筑波大学システム情報工学研究科

*1 Graduate School of System and Information Engineering, Univ. of Tsukuba

通信研究所で開発されたATLAS[6]などがある。連続面型は、ランニングマシンのように自然な歩行・走行動作の実現が可能だが、凹凸や階段の表現は難しい。また、装置が巨大で可搬性に難がある。「部分面型」はアクチュエータをとりつけたフットパットが上に乗った歩行者の足の動きに追従して歩行面を形成するインタフェースである。凹凸の表現が可能でターンテーブルにより斜め移動もできるが追従精度に限界がある。装置としては、筑波大の Gait Master[7]などがある。こちらは現在リハビリ用に開発が進んでいる。「装着型」は駆動機構を取り付けたシューズを歩行者が装着することで足の引き戻しを行うというインタフェースである。他のタイプと比べて小型で可搬性に富むが、凹凸の表現が出来ず、足に取り付ける拘束感があり自然な歩行感覚を与えにくい。代表例として、筑波大の String Walker がある。最後に「循環型」は、数個の可動床により歩行者に無限の歩行面を提供する。ユーザの体と装置は非拘束である為自然な歩行感覚を与えられる。ロボットタイルは Circular Floor[8]とも呼ばれ本研究で用いたシステムは可動床ロボット VMAX(以後、VMAX と呼称)に昇降機構を取り付けたことで、階段を上っている感覚も与えることができる。VMAX が1台1台独立している為可搬性に関しても小分けにできる点で優れている。歩行面を形成する為に VMAX がユーザの前に回り込む為、連続面型に比べて歩行者の移動速度や急な方向転換に限界があるが、可搬性に優れ様々な歩行感覚を提示できる

球面ディスプレイの関連研究としては、Ensphered Vision[9]がある。これは前面投射方式の球面ディスプレイで、平面鏡と凸面鏡を使って、ディスプレイの上方に設置したプロジェクタの映像を球面全体に投影する手法を用いている。背面投射に比べ、プロジェクタの台数は少なく、プロジェクタを球面ディスプレイ内に置くことができるのでコンパクトにできるが、内部相互反射の影響でコントラストが低下しやすく、解像度が上げにくい。

歩行感覚提示装置と映像提示装置との統合例としては、奈良先端科学技術大学院大学の連続面型の Walk Master と Visual Valley の統合[10]や、部分面型の Gait Master と Ensphered Vision の統合(直進移動のみ)、装着型の String Walker と Ensphered Vision との統合例がある。しかし、循環型、背面投射型ディスプレイとの統合例は前例がない。

3 ロボットタイルとリアドームの統合

ロボットタイルは、ロコモーションインタフェースの各種の実現方式の中で、最もポテンシャルが高いものである。トレッドミルを用いる連続面型は、平ら床では自由な歩行を可能にするが、階段などの凹凸面の提示が困難で、装置本体が巨大になるという問題がある。部分面型は、

凹凸面の提示はできるものの、足の動作に正確に追従するのが困難で、自由な歩行が妨げられる、という限界がある。ロボットタイルはこれらの問題を全て解決する方式である。

次に、リアドームは没入ディスプレイの中で最もポテンシャルが高い方式である。球面スクリーンは多面体スクリーンに比べて、スクリーンの継ぎ目で画像が折れ曲がるという問題がなく、目とスクリーンの距離が常に等しいので、自然な映像が提示できる。また、背面投射は前面投射に比べて、中に入っている人の影ができず、また投影光が内部相互反射を起こすことによるコントラスト低下も少ないので、画質的に有利である。

このように、本研究では現時点で考えられる最新で最良の歩行感覚と視覚のディスプレイを統合することを目指し、システムを実装した。

統合した装置の概観を図1に、実際に歩行している様子を図2に示す。

別々に開発された2つの装置を統合するに当たって以下の3点を実現する必要があると考え、各装置の改良を行った。

- ・2 装置の座標系の一致
- ・インタラクティブな全方位移動
- ・CG・実写どちらの空間でも歩行可能

歩行と映像の座標系を合わせる為、リアドームの球面スクリーンを支えるフレームを移動可能にし、調整を行えるようにした。次に全方位移動をスムーズに行う為、球面スクリーンやフレームの再設計をした。ロボットタイルは外界センサを使って VMAX の位置を取得し制御を行っていたが、リアドームによって測定領域が限られるようになり、また映像との一致を計る為、常に位置を把握する必要がある。その為、オドメトリによる自己位置推定と外界センサ補正を組み合わせた。さらに床面との滑りによるずれを軽減する為、ゴムシートを敷いた。最後に既存の球面ディスプレイでは、決まった映像を流していたが、今後ゲームや訓練など様々な用途に対応できるよう、CG 画像と実写画像の両方の入力をフレキシブルに受けられるよう改良した。各装置の概要と具体的な改良について4章、5章で述べていく。

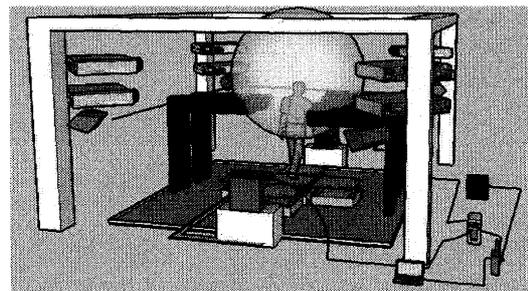


図1 統合システム概観

Fig.1 General view of integrated system

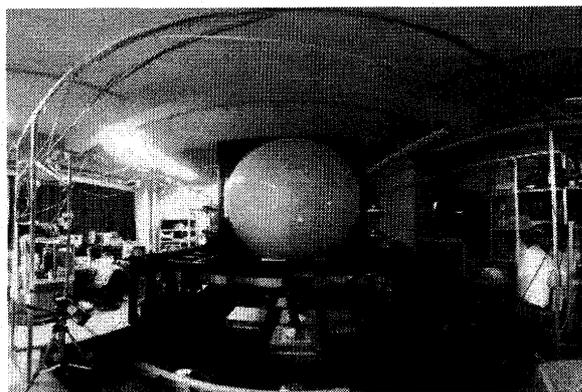


図2 統合システム写真(パノラマ写真から切り出し)

Fig.2 Photograph of integrated system(Cutting out from a panorama shot)

4 ロボットタイル

図3は、本研究で用いたロボットタイルのシステム全体図である。VMAX5台、各VMAXの位置を取得する為の光学式外界センサPhaseSpace[11]、歩行者の位置を取得する為のレーザレンジスキャナ(SICK LMS200[8])、それらを制御するPC群、通信の為の無線LANルータ、VMAXを動かす為の床面から構成される。スムーズな循環を実現する為に設置面積は4000[mm]×4000[mm]の正方形領域とした。

PhaseSpaceのカメラはRear Domeのフレームによる計測領域減少の影響と計測精度を鑑みて1200[mm]の高さの支柱に取り付けた。

4.1 可動床ロボットVMAX

VMAX(図4:右図は天板を外して上方から見た画像)は、455[mm]四方の歩行面を作り、高さ230[mm]で重量は44[kg]である。衝突時に本体を保護する為、厚さ20[mm]のウレタンバンパーを周囲に装着した。水平面移動用機構は、Omni-Disk機構[12]を用い、昇降機構はカムによって実現した。水平面移動にmaxon社製のDCモータRE35を4つ、昇降機構に同社製のブラシレスモータEC45を1つ用いた。電源供給にはパナソニック製EZ9210ニッケル水素電池を用いた。フル充電で約1時間程度の連続稼働が可能である。充電時間は30分程度である。各VMAXの制御マイコンは、制御PCとの通信モジュール(dsPIC30F3013)と各車輪を独立して制御する分散基板(30F4012)4枚からなる。マイコンは制御PCから受け取った各車輪の速度指令値を分散基板を介してモータドライバに出力する。モータドライバはOmni-Disk機構駆動用に岡崎産業株式会社製のTITECH DRIVER JW-143-2、昇降用にはmaxon社製DES70/10を用いた。また、各モータにはロータリーエンコーダが取り付けられており、分散基板で車輪の回転数を計測し、制御用PCに送信する。なお、制御PCとマ

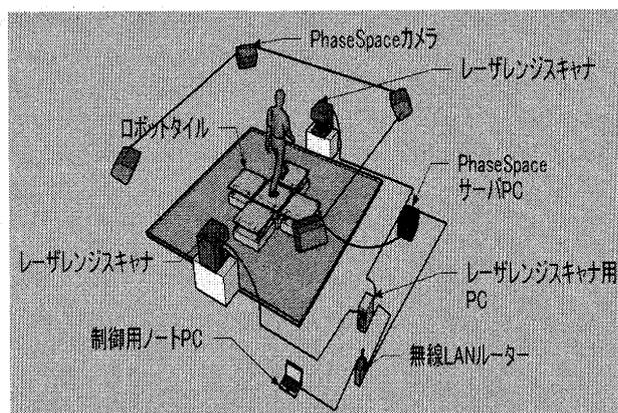


図3 ロボットタイルシステム外観

Fig.3 Overview of the Robot Tile system

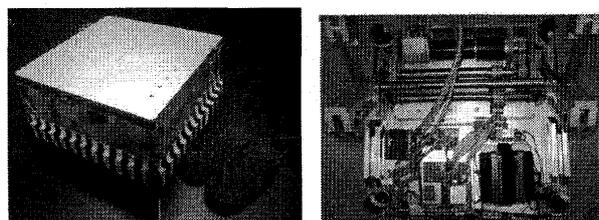


図4 VMAX

Fig.4 VMAX

イコンの通信は、Lantronix社製の組み込み用無線LAN対応サーバWiPortを用いた。通信方式は、UDPとTCP/IP切り替え可能となっており、どちらの方式でも通信周波数は約25Hzであった。

4.2 改良点

3章でも述べたように、リアドームによってPhaseSpaceの測定不能領域が生じるが、継続して動作させる必要がある。そこでPhaseSpaceで計測出来ない領域ではVMAXの各車輪の回転数をもとにしたオドメトリによる自己位置推定により解決した。ロボットタイルの制御フローチャートを図5に示す。制御PCに、各VMAXから車輪の回転数、PhaseSpaceから各VMAXに取り付けたマーカ位置、レーザレンジスキャナから歩行者の足位置が送られる。マーカ位置が取得出来た時にはマーカ位置を、取得できない時はオドメトリにより、各VMAX位置を導出する。レーザレンジスキャナから取得した歩行者の位置・進行方向から、後述する循環アルゴリズムによって各VMAXへの速度指令値が決定され、送られる。

しかし、自己位置推定では走行時の床面との滑りによるズレを検知することができない。そこでこの滑りを軽減する為、摩擦係数の大きいゴムシートを敷いた。効果を調べる為、普通の床、ゴムシート、ゴムシート+PhaseSpace補正の各場合でVMAXを1台自己位置推定でジグザグ走行させた時の軌跡を計測した(図6)。『零』と書いてある四角形がVMAX、ジグザグの線が目標経路である。VMAXの姿勢は滑りが発生すると傾くが、傾かずに字が見えるのが望ましい向きである。ゴムシー

トを敷くことにより滑りが軽減され経路に沿って移動させることが出来たが、若干傾いてしまっている。ゴムシートだけでなく PhaseSpace による補正を加えることで、位置、姿勢のズレも抑え理想の移動をさせることが出来た。

本システムでは複数の VMAX が近接して走行する為、位置や姿勢がずれると衝突の危険がある。その為、循環運動中の誤差は位置 2[cm]程度以内、姿勢 1 度程度以内に収まっていることが望ましい。上記の手法により補正を行った結果、歩行者が 10 分ほど歩き続けても VMAX 同士が衝突せずに循環運動を続ける事が出来た為、十分な精度が確保されている事が確認出来た。

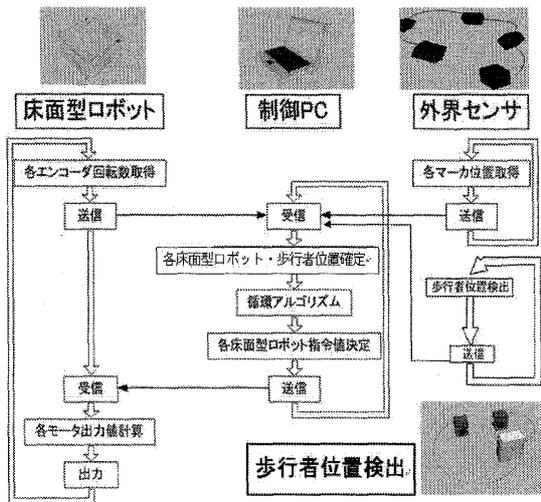


図5 ロボットタイル制御フローチャート

Fig.5 Robot Tile control flowchart

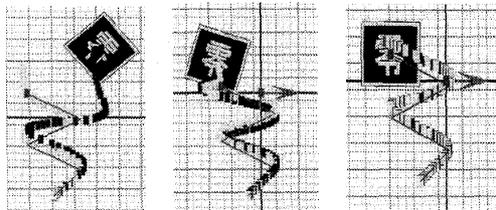


図6 ジグザグ走行 (左:普通の床 中:ゴムシート 右:ゴムシート+PhaseSpace 補正)

Fig.6 Zigzag running (Left: normal floor Center: rubber seat Right: rubber seat + PhaseSpace correction)

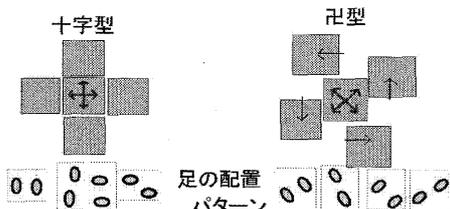


図7 足位置による各 VMAX の配置

Fig.7 Arrangement of each VMAX by foot position

4.3 循環アルゴリズム

5 台の VMAX は、中心となる VMAX が 1 台あり、その周囲 4 方向に残りの VMAX が配置される。歩行者の足の向きは測定された足位置から 45 度刻み (例えば、90 度と判定されるのは 67.5 度~112.5 度の間) で判定し、0 度、90 度、180 度、270 度の時は十字型、45 度、135 度、225 度、315 度の時は U 型と異なる配置がなされる。図 7 に足の向きと VMAX の配置の様子を示す。

2 つの VMAX 配置の切り替えは、歩行者が床面の中心で歩かず立ち止まっている時に行われる。つまり、レーザレンジスキャナで捉えた足位置が床面中心から一定の範囲に納まっている時に行われる。約 2 秒間、それまでの足位置と異なる状態が連続して続くと、VMAX の配置を切り換える。2 秒という時間を設けたのは、例えば前進をしている時、片足を踏み出すと U 型の配置と同じ足位置になり U 型に配置を切り換えてしまう誤認識が起こるのを防ぐ為である。

VMAX 配置が決定した時点では、4 方向のどちらに進むかは考慮しない。歩行者が足を踏み出し、重心位置が床面中央からずれた時、どの VMAX に乗り移ったかを推定し引き戻し動作を行う。乗り移った VMAX を新しい中心として、進行方向に応じて、周囲 4 方向に回り込み用の VMAX の新しい目標地を設定する。目標地との距離に応じて、どの VMAX を向かわせるか決める。移動は中心の VMAX に沿うように移動する。中心の VMAX は床面の中心を目標地として移動し、周囲 4 方向の目標地も併せて移動する。図 8 に移動例を示す。各図の状態を説明する。

0:『零』に人が乗って停止

1:『壺』に乗り移り、その他の VMAX の目標地が決定

2: 歩行面『壺』を床面中心に引き戻すように全体が移動

3: 歩行面の引き戻しが終了し、全体の移動が停止。

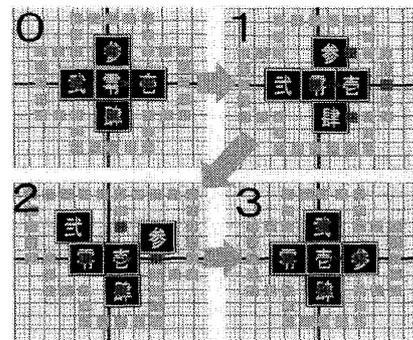


図8 各 VMAX の移動

● VMAX
 ■ 各 VMAX の最終目的地
 ■ VMAX 移動方向の候補

Fig.8 Movement of each VMAX

5 リアドーム

5.1 リアドーム概要

背面投射型とは球面の外側(背面)から投影する方式で高い解像度が得られる。また、球面ディスプレイの材質はアクリルで、スクリーン内部に拡散材がコーティングしてある。これによりプロジェクタの光線がスクリーン表面で拡散され、反対側のスクリーンに届く光量を抑えることで内部反射によるコントラストの低下を防ぐ。HMDのように装着の必要もなく、非拘束に全周に映像を提示出来る。また、前面投射型に比べ室内が少し明るくても映像を見ることが出来る為、足元が真っ暗にならず歩行し易くなる。直径約1000[mm]の球面スクリーンで作ったプロタイプと、前面投射型のEnshpered Visionとで性能を比較した。輝度値を0~255まで変化させて四角形を投影した時の平均照度から階調特性を調べた(図9)。リアドームは最大輝度時にEnshpered Visionの8倍以上の照度が出ている。また、輝度値0と255時の平均照度の比からコントラスト比を求めたところ、Enshpered Visionが128:1であるのに対し、リアドームは304:1と約2.4倍であった。一般のCRTディスプレイが220:1、LCDディスプレイが300:1であり、リアドームは日常で使われているディスプレイ程度のコントラストが出せる。

ロボットタイトルと統合するに当たって、スクリーン下部の開口部を設け体験者が出入り出来るようにした。ロボットタイトルによる歩行で床面中心から一步分移動する領域を確保する為、開口部の大きさを直径800[mm]とした。人間の垂直視野を映像で覆う為、開口部は南緯60度の位置とすると、球面スクリーンの直径は1600[mm]となる。球面スクリーンは半球を2つ繋いで製作されており、接合部は各半球のフランジをネジ止めした。ロボットタイトル体験時に身長170[cm]の人間の視線が球の中心に

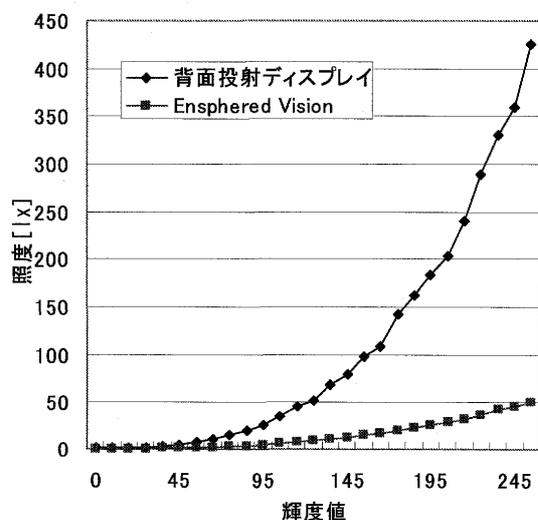


図9 階調特性

Fig.9 Gradation characteristic

なるよう、床面から1800[mm]の高さに固定するフレームを付けた。フレームはVMAXの走行を邪魔しないよう、走行領域の外側で接地する門構えのような形状とした。また、PhaseSpaceの測定領域を確保する為、フレームに隙間を設けた。そして、ロボットタイトルの座標系と一致させる為、接地部にキャスターを取り付けスクリーン位置を調整可能にした。プロジェクタもVMAX走行領域の外側に設置した。これにより、リアドームの設置面積は4000[mm]×4000[mm]となった。

プロジェクター台あたりの解像度は1280×720[pixel]で、投影範囲は球面ディスプレイの水平方向95度、垂直方向65度分である。設置箇所は床面から下段が約1400[mm]、上段が約2000[mm]で、スクリーンへの距離は最短1700[mm]である。各プロジェクタは半球の中央を緯度・経度0度としたときに、経度45度・135度・225度・315度の場所に設置した。グラフィックカード(NVIDIAのGeForce 9800 GT)1枚につき2台のプロジェクタを繋ぎ、PC1台にカード2枚でプロジェクタ計4台の映像をPC1台で生成した。2台のPCで各半球に映像を投影する(以後、前半球・後半球と呼ぶ)。

5.2 投影画像作成

投影画像のソース画像は、歩行を前提とするとCGによる映像と実写映像の2つが考えられる。CG映像はレンダリングの原理上、中心から遠くなればなる程歪みが生じる。後述のLadyBug2のようなカメラで撮影したパノラマ画像は予め歪み補正が行われている。さらに、球面ディスプレイにプロジェクタで映像を投影する際にも歪みが生じる。これまではこれらをテクスチャマップによる歪み補正で一括して吸収していた為、CGと実写映像とで歪み補正テーブルが異なっており、プログラムも別々に開発していた。本研究では、最後の歪み補正を共通化する為、(1)パノラマ画像作成・(2)等緯度変換・(3)歪み補正の順で、映像を変形・作成した。

5.2.1 パノラマ画像作成(CG)

リアドームに投影する画像は、水平角360度のパノラマ画像でなくてはならない。しかし、視野角360度の映像を作ることは出来ない為、近似した画像を作成する。ある地点から透視投影・等角度刻みで撮った画像を360度分横に並べた。本研究では、45度刻みで8枚の画像を撮り一枚の画像とした(図10)。上下の角度は人間の視野角を考慮して、上下とも60度までを撮影範囲とする。

5.2.2 等緯度変換(CG)

OpenGLで作成した画像は、透視投影の為、経線は等間隔で表示されるので問題ないが、緯度に関しては、中心ほどつぶれて緯度が高くなるほど1度あたりの間隔が広がる。このまま投影してしまうと正しく映像を見ることができない。本システムでは、北緯・南緯60度の位置

が原画像でも決まっており、それを元に切り取り点テーブルを作成していることを利用して、緯度に関して等間隔になるように元画像を変換する(図 11). リアドーム内から見た変換なしとありの最終的な画像を図 12 に示す. 図 12 の黄色い線は glutWireSphere で描いた経線・緯線である. 経線はどちらも等間隔であるが、緯線は変換前の画像では等間隔でないが、変換後では等間隔になっている. また、球体も赤道付近に描いてある為、変換前は緯線方向に潰れた楕円体になっているのに対し、変換後は球体として正しく描かれている.

5.2.3 歪み補正(CG・実写)

球の背面から映像をそのまま投影し、中心からその映像を観察する場合、投影映像は歪んでしまう. 観察者に歪みをなくした映像を提供するには、あらかじめ球面に合わせて歪み補正を加えた映像を投影する必要がある. 歪み補正の具体的な方法は、すでに求めてある座標で作られた格子マップをスクリーンに投影し、そ

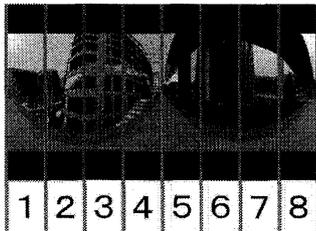


図10 作成したパノラマ画像
Fig.10 created panoramic image

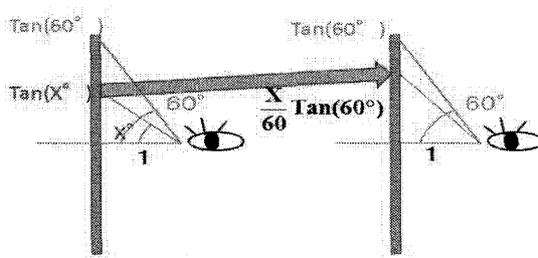


図11 等緯度変換
Fig.11 Latitude conversion

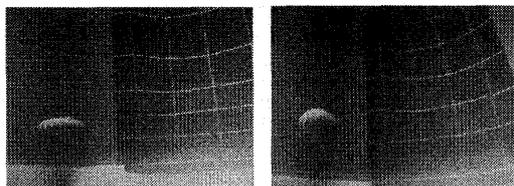


図12 左:変換なし 右:変換あり

Fig.12 Left: No conversion Right: Conversion

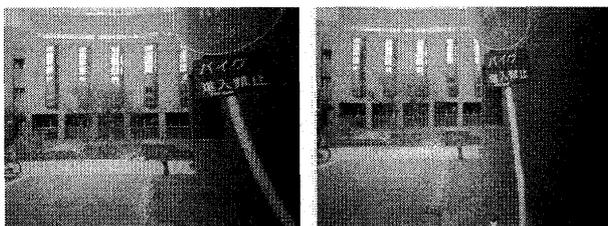


図13 左:補正前 右:補正後

Fig.13 Left: Before correction Right: After correction

れを表示させたい位置に手動で移動させる. 画像を元の格子マップで切り取り、手動で作ったマップの対応点に合わせてテクスチャマッピングで表示をする. 実際に球面内部から見た補正をかける前後の画像を図 13 に示す. 左図では奥の建物の上部や手前の標識の柱が曲がっているが、右図では補正をかけたことで真っ直ぐに表示されていることが分かる. また、隣り合うプロジェクタ同士の画像を一部重ね、映像を投影した時、繋ぎ目を目立たなくするようにアルファブレンディングを行った.

6 評価実験 1 距離認識

6.1 目的

統合システムが機能していることを実証する為、空間認識の実験を行った. 人が歩いて移動することに伴う距離感などの空間知覚について定量的な実験を行うことは、実世界では極めて困難である. 被験者に見えるものを条件統一するために広大で均一な壁や床を作らなければならない、更に、それを実験パラメータとして瞬時に変化させなければならない為である. そこで、CG で世界を提示することが必須となる. このような実験がこの統合システムを用いてできることを、ゲームなどで使われるジョイスティックと比較し検証することが目的である.

6.2 手順

リアドームにバーチャル空間の映像を投影し、歩行による距離認識実験を行った. 図 14 のようにある方向に直線の道とゴールを用意し、ゴール地点に達すると別の方向に道とゴールを表示させ、またそこまで移動してもらう. 最初が斜め方向で次が直線方向である. これは VMAX の配置が 2 通りある為である. 次に、先程と同じ方向に道が表示されるがゴール地点は示されない状態で被験者に移動させて、先程と同じ距離に達したと思ったら申告させ、どの程度正確に歩けたかを検証した. 入力デバイスはロボットタイルとジョイスティックとを用いた. 被験者は健康な大学生 8 人で、各入力デバイスにつき 2 回ずつ計 4 回試行した. 順序効果を鑑みて、ロボットタイルを始めに行う組と後で行う組で 4 人ずつ行った. また、試行後に体験の感想を聞いた. 図 15 にリアドーム内部から見た映像を示す. 映像生成用 PC とロボットタイル PC は、有線 LAN を通じて同期させた. ロボットタイルで歩行者の重心の乗った歩行面の VMAX の移動方向と速度をリアドーム PC に送る、リアドーム PC は VMAX の移動方向に合わせて視点を動かす. このとき、歩行面の VMAX は歩行者のわずかな動きにも反応して小刻みに動いているので、そうした移動は映像生成用 PC では無視することで映像を安定させた. 2 台のリアドーム PC 同士でも

同期をとる為、ロボットタイル PC との通信は1台が行い、視点の位置・向きをもう1台のリアドーム PC にも送信した。

6.3 結果・考察

図16に、ゴール表示あり時の歩行距離に対する2回目の移動量の割合の平均値を%表示したものをデバイス毎に示した。各デバイス16個のデータが得られるはずが、データ2個分が正しく取れなかった為、正しく得られた14組に関してまとめた。

この結果は、ロボットタイルを使用した方が平均値が100%に近く、また標準偏差もジョイスティックを用いた場合の3分の1程度と小さいことを示している。したがって、歩行運動によって、正確な距離感覚を得られていると推

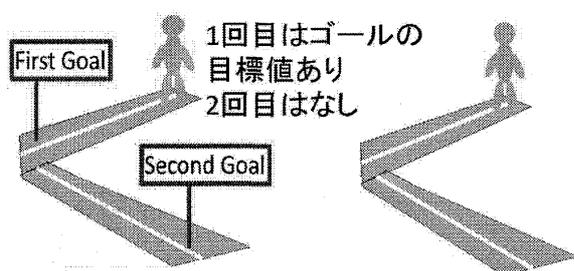


図14 距離感認識実験概要

Fig.14 Outline of experiment concerning recognition of sense of distance



図15 リアドーム内から見た映像

Fig.15 Image seen in Rear Dome

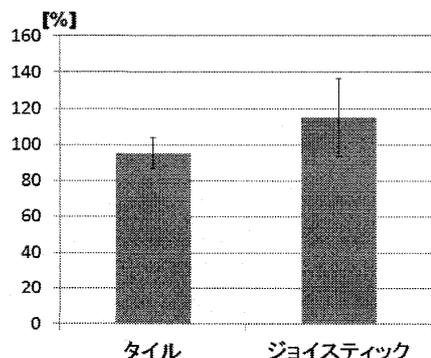


図16 距離感認識実験結果

Fig.16 Result of experiment concerning recognition of sense of distance

定される。

今回のデータは、両モードの間に有意差はなかった。各データは正規性の検定の結果、正規分布では無かったので、ウィルコクソンの符号付き順位和検定を行った。「2つのデータに差は無い」という帰無仮説を立て、検定を行ったところ、棄却限界値を超えた為、「2つのデータに差があるとは言えない」という結果になった。しかしながら、本統合システムは空間認知の実験に十分使用可能であることが、この実験から明らかになった。

7 評価実験2 実写画像による歩行

7.1 目的

人間にとって自身の足で歩くことは最も生得的な移動手段であり、また、急激な方向変換が可能である。その為、遠隔のロボットを操縦する場合も、自分の歩行と同じように移動させれば、ハンドルなどで乗り物を操縦することに比べて、動きの自由度が高く、円滑な移動が実現できると考えられる。このような方向変換動作が本システムで可能かを実証する為に、屈曲した経路を設定し、遠隔地の移動車両にカメラを取り付けリアルタイムで映像を見ながらロボットタイルで移動し、目標地まで歩行する実験を行った。

7.2 装置概要

実写画像の投影には、画像取得用カメラを取り付けたロボットタイルの移動に合わせて動く車両が必要となる。この車両の外観を図17に示す。車両にはVMAXを1台用いた。このVMAXを今後RVMAXと呼称する。RVMAX上にはカメラ、カメラを取り付ける台、取得画像データ送信用のノートPCを載せた。また、車両から配線を出さないようVMAX用バッテリーとセルスター工業株式会社のDC/ACインバータHG-350/24Wを用いて、カメラとノートPCの電源を確保した。

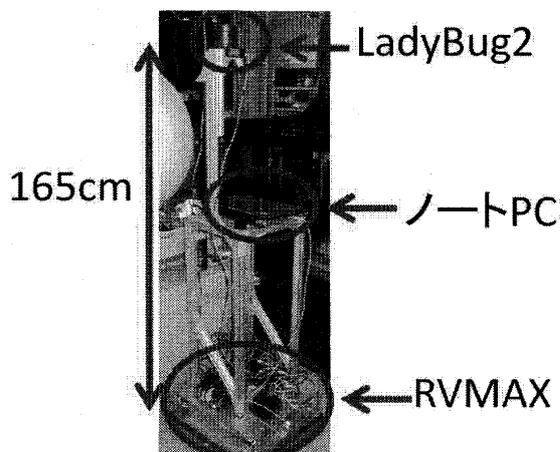


図17 遠隔操作車両外観

Fig.17 Overview of teleoperated vehicle

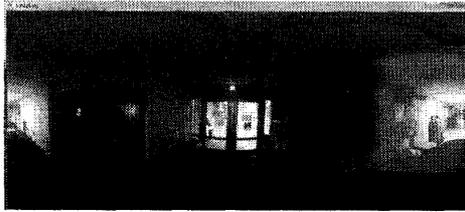


図18 LadyBug2で撮影したパノラマ画像
Fig.18 Panoramic image by LadyBug2

カメラには Point Grey Research 社の Ladybug2 を用いた。Ladybug2 は 1024x768[pixel]のカラーCCD が側面に5個、上面に1個は配置されている。ベイヤー配列の画像を最大 30[fps]で生成することができる。全周の約75%の視野をカバーし、水平方向 360 度に関しては 3840[pixel]、鉛直方向に関しては 1220[pixel]、トータルで約 4.7 メガピクセルの高解像度のパノラマ画像を生成できる。なお、仰角は 90 度、俯角は 50 度となっている。カメラを 165[cm](身長 170[cm]の人間の目線と同程度の高さ)に設置した。LadyBug2 で取得した画像を図 18 に示す。

LadyBug2 から取得した画像をノート PC で 1000x500[pixel]にして JPEG にエンコードしてから、2 台のリアドーム PC へと無線で送る。この時、ロボットタイル制御と混線しないよう、無線 LAN ルータをもう一つ用意した。画素数を 1000x500 にしたのは、それよりも大きいサイズだとフレームレートと遅延により、歩行に支障をきたし、画素数を下げるとフレームレートは上がるが、目標地点の認識が不可能になる為である。リアドームの出力におけるフレームレートは平均 3[fps]、遅延は平均 1[s]弱であった。

RVMAX の制御は、ロボットタイル制御と同じ PC を用いて行った。ロボットタイルの歩行面となった VMAX への速度指令値を半分にしたものを RVMAX にも送る。半分の速度にしたので、歩行者が一步歩く毎に 20[cm]進む。また、前章の実験と同様、一定値以下の速度の時にはブレを防ぐ為動かさないようにした。RVMAX が床との滑りを起こさぬよう、マットを敷いて実験を行った。システム全体の概要を図 19 に示す。

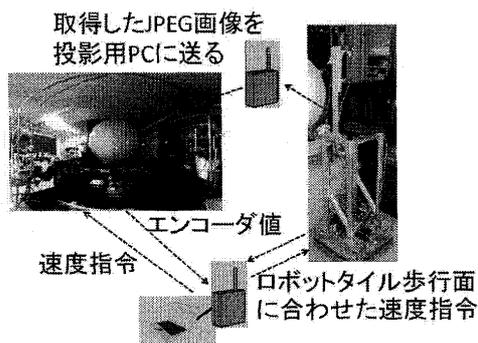


図19 実写画像歩行実験概要

Fig.19 Outline of walking experiment in photographed image

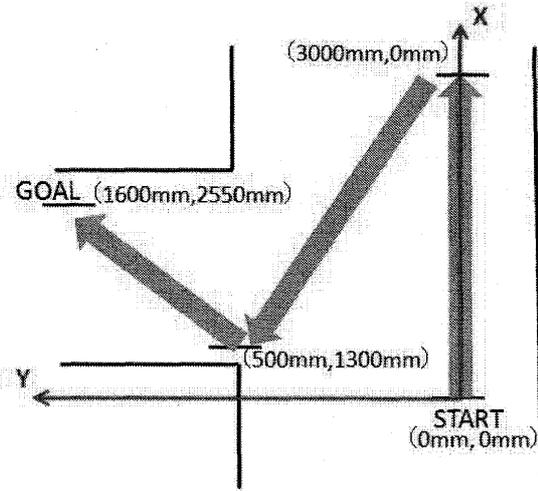


図20 歩行コース

Fig.20 Walking course

7.3 手順

始めに被験者にカメラ付き遠隔操縦車両を見せ、カメラの位置や目標地点を説明した。目標地点は3箇所をポールを立て、順に巡るコースになっている。図20は歩行コースを示しており、座標はスタート地点を原点としたもので単位は[mm]である。目標地点への到達判定は歩行者がぶつかったと自分で判断したら次の目標地点に進ませ、3つ目の目標地点で終了とした。実験後にアンケートをとった。被験者は健康な大学生の男性6名で1回ずつ実験を行った。

アンケートは、急激な方向変換動作時などにVR酔いが併発しないかを検証する為、シミュレータ酔い用の主観的評価尺度 Simulation Sickness Questionnaire 通称 SSQ[13]と自由記述からなる。

7.4 結果・考察

SSQの結果を各項目別ごとにまとめたものを図21に載せる。また、「気持ち悪さ(N)」、「目の疲れ(O)」、「ふらつき感(D)」、「トータルスコア」を算出した結果を図22に載せる。グラフから、「目が疲れた」、「ぼやけて見える」の項目の点数が高いことが分かる。SSQスコアでは、「目の疲れ」が一番高くなっている。実写映像は、元々の画像を遅延やフレームレートを考慮して画素数を下

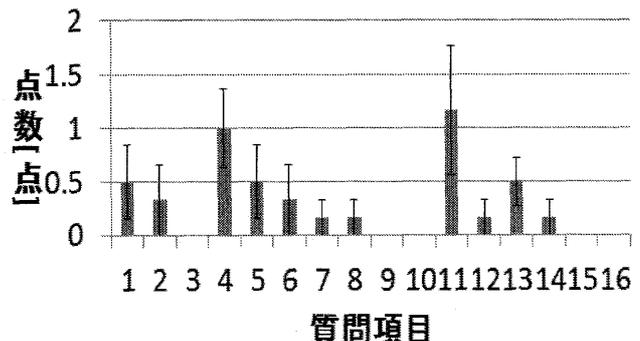


図21 SSQ各質問別平均値

Fig.21 Mean value according to each SSQ question

真中・矢野・岩田: ロボットタイトルとリアドームの統合に関する研究

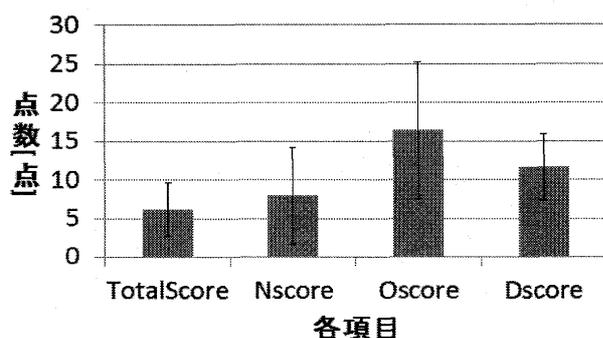


図22 SSQスコア

Fig.22 Score of SSQ

げてある為、遠くの実物体などはぼやけてしまう。また、ロボットタイトルでの歩行では一歩分踏み出すと VMAX に引き戻される為、頭の位置が変化する。スクリーンとの距離が近い為、僅かな頭の移動であっても視野に入る映像領域の変化は大きく、目の疲れに繋がっていると推察される。ロボットタイトルで歩行時に生じる、一歩分の移動範囲内で目の疲れや圧迫感を与えないスクリーンサイズを検討する必要がある。

自由記述で記載された主なものを以下に記す。

- ・目標物体が切り換わり、周囲を見回してそちらに歩き出す時に臨場感や没入感を感じた。
- ・歩行が終わった後、ロボットタイトルから降りる時に自分が実空間でどちらを向いているか分からなくなった。
- ・カメラのブレなどは感じない。違和感もあまりない。
- ・スクリーンとの距離が近く、歩きにくい。
- ・足元に映像が出ない為、現在位置が分かりにくい。
- ・ロボットタイトルによる引き戻し時に(自分が立ち止まっている時に)映像が移動する感じ。

自由記述にある「目標地点を見回して探す時に臨場感があった」というのは一般のディスプレイでは瞬時には映し出せない箇所の映像も提示しておくことで、日常で歩行中に方向変換する時と同様の感覚を提示できたと考えられる。「体験後に自分が実空間でどちらを向いているか分からなくなった」という様に画像にぼやけているところはあっても、歩行と全周囲映像によって高い没入感を出せていることが分かる。また、歩行の為動くことに加えて、映像がぼやけていることやフレームレートがそれほど高くないことが、「カメラのブレは気にならない」という結果にも繋がった。「足元の映像が無い為、現在位置が把握しづらい」とあったが、リアドームは、南緯 60 度以下は出入りの為切り取られており、足元の映像が提示されない。実世界では、人間は足元を見ることで歩行面を確認し、自分と周囲との距離関係を推定する為、このような意見が出たと考えられる。また、「ロボットタイトルによる引き戻し時に(自分が立ち止まっている時に)映像が移動する感じ。」という意見があった。歩行動作による人の立ち位置がリアドームの中心から移動すると引き

戻しが行われるが、応答速度が十分でないことが原因として挙げられる。人の位置を測定するレーザーレンジスキャナの値を用いて歩行動作時のみ映像を動かすなどの違和感の低減策が必要と言える。

8 考察

ロボットタイトルとリアドームを統合する為、それぞれの装置に改良を加えた。それにより、自分の足で全方位移動をしながら、それに同期して全周囲映像を提示することが出来た。統合したシステムの性能を調べる為、評価実験を行い、CG 空間での距離認識や、ロボットの遠隔操縦においても急な方向変換が本システムで可能であることが分かった。しかし、目の疲れが生じるといった問題点も見つかった。

ロボットタイトルでの歩行を想定して設計した球面スクリーンであったが、体験者と接触はしないものの、圧迫感や目の疲れを与えてしまった。再設計の必要がある。

ロボットタイトルによる全方位移動であるが、8 方向への移動という分解能の低さとフォーメーションの切り替えの煩雑さから自然な歩行感覚の提示は十分には出来ていない。解決策として周囲 8 方向を全て VMAX で覆う 9 台循環という手法が考えられる。これにより、移動方向転換による停止時間を減らすことができる。また、5 台では 45 度の分解能でしか移動出来なかったが、全周囲に足場があることにより、理論上、レーザーレンジスキャナの測定分解能(本システムは 1 度)で移動ができることになる。さらに床面を一様に VMAX で埋めることで床面周辺への映像投影も可能となる。

CG 空間では距離感覚の提示が出来ていることが分かったが、実写では足元の映像がなく分かりにくいという意見があった。CG 空間は一人称視点のゲームに馴れ親しんだ人には足元の映像がなくても認識がし易いと考えられる。また、歩行者の身長によって頭部が球の中心にこない、同じ物体でも感じる距離感が変わってしまう恐れがある。球面スクリーンを支えるフレームとプロジェクタ台を連動して上下する機構を追加するといった対策が必要になる。

9 まとめ

本研究では、空間に対する距離感や方向感覚が上昇するといわれる歩行動作に伴う「見え」の変化を、全方位に対して実現するシステムを提案した。歩行感覚提示装置『ロボットタイトル』と全周囲映像提示装置『リアドーム』を統合するにあたって改良を加え、CG 空間あるいは実写画像空間での歩行実験を行った。実験を通して本統合システムが、距離感覚の提示や急激な方向変換が可能であることが分かった。自然な歩行感覚を与えら

れるよう改善を加えていくことで、今後、エンターテインメントだけでなく訓練や建築といった様々な分野で、活躍することが期待される。

なお、本研究は戦略的創造研究推進事業(CREST)プロジェクト「デバイスアートにおける表現系科学技術の創成」における研究課題として行われた。

参考文献

- [1] Ware, C., and Slipp, L. (1991). Using velocity control to navigate 3D graphical environments: A comparison of three interfaces. Proc. of the Human Factor Society 35th Annual Meeting, 300-304
- [2] Witmer, B.G., and Kline, P.B. (1998). Judging Perceived and Traversed Distance in Virtual Environments, PRESENCE, 7(2) 144-167
- [3] Bakker, N.H., Werkhoven, P.J., and Passenier, P.O. (1998) Aiding Orientation Performance in Virtual Environments with Proprioceptive Feedback. Proc. of IEEE 1998 Virtual Reality Annual International Symposium, 28-33
- [4] Chance, S.S., Gaunet, F., Beall, A.C., and Loomis, J.M. (1998). Locomotion Mode Affects the Updating of objects Encountered During Travel: The Contribution of Vestibular and Proprioceptive Inputs to Path Integration. PRESENCE, 7(2) 168-178
- [5] Hiroo IWATA and Yoko YOSHIDA: Path Reproduction Tests Using a Torus Treadmill, PRESENCE, Vol.8, No.6, pp.587-597 (1999)
- [6] 野間春生, 宮里勉, 中津良平, 「能動的歩行動作に対応した歩行感覚提示装置の開発」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.4 No.2 pp.407~415, 1999
- [7] 岩田洋夫, 「凹凸面を提示する仮想歩行装置 Gait Master」, 日本バーチャルリアリティ学会第4回大会論文集 pp.348-348, 1999
- [8] 福島寛之, 矢野博明, 野間春生, 岩田洋夫, 「全方位移動ロボットを用いた歩行感覚呈示装置 CircularFloor」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.11 No.2 pp.237~244, 2006
- [9] 橋本渉, 岩田洋夫, 「凸面鏡を用いた球面没入型ディスプレイ: Ensphered Vision」, 日本バーチャルリアリティ学会論文誌 Vol.4 No.3 pp.479-486, 1999
- [10] 峠田正樹, 山澤一誠, 横矢直和, 「歩行装置と没入型ディスプレイを用いたネットワークを介した移動ロボットの遠隔操縦」, 電子情報通信学会技術研究報告. CQ, コミュニケーションクオリティ 103(661), pp.13-16, 2004
- [11] PhaseSpace. <http://www.phasespace.com>
- [12] 駄本理一郎, Wendy Cheng, 広瀬茂男, 「Vuton II: Omni-Diskを用いた全方向走行車の開発」, 第6回ロボットクスシンポジウム予稿集, pp.255~260, 2001
- [13] Robert S. Kennedy, Norman E. Lane, Kevin S. Berbaum, Michael G. Lilienthal, Simulator Sickness Questionnaire: An Enhanced Method for Quantifying Simulator Sickness, THE INTERNATIONAL JOURNAL OF AVIATION PSYCHOLOGY, 3(3)pp.203-220, 1993

(2011年3月8日)

[著者紹介]

真中 勇太 (学生会員)



2009年筑波大学第三学群工学システム学類卒業。現在、同大学院システム情報工学研究科博士前期課程在学中。歩行感覚提示に関する研究に従事。

矢野 博明 (正会員)



1997年筑波大学大学院工学研究科修了。同年日本学術振興会特別研究員(PD), 99年筑波大学講師, 現在、同大准教授。力覚提示, 移動感覚提示に関する研究に従事。博士(工学)。

岩田 洋夫 (正会員)



1981年東京大学工学部機械工学科卒業, 1986年東京大学大学院工学系研究科修了(工学博士), 同年筑波大学構造工学系助手。現在、筑波大学システム情報工学研究科教授。バーチャルリアリティ, 特にハプティックインタフェース, ロコモーションインタフェース, 没入ディスプレイの研究に従事。2004年より, デバイスアートのプロジェクトを主導。日本バーチャルリアリティ学会副会長。